武夷山景区松墨天牛种群密度与环境因子的坐标变换对应分析

杜瑞卿[1,2]，陈顺立[2,*]，余培旺[3]，范正章[2]
（1. 河南南阳师范学院生命科学与技术学院，河南南阳 473061；
2. 福建农林大学林学院，福州 350002；3. 武夷山林业局，福建武夷山 354300）

摘要：为了探明松墨天牛 *Monochamus alternatus* Hope 种群密度指标与环境因子的对应关系，在福建武夷山风景区设立了 10 块马尾松林监测标准地，通过对松墨天牛的 6 个数量指标和 7 个环境因子的调查，对调查结果进行了坐标变换对应分析。结果表明：海拔(Y_1)对松墨天牛的 6 个指标都有正向的促进作用，郁闭度(Y_6)和地被物覆盖率(Y_7)对 6 个指标都有负向的抑制作用；林龄(Y_2)、树高(Y_3)、坡向(Y_4)，也都是正向的促进作用，但影响程度也较小；坡位(Y_5)关系最不密切，影响程度也较小；最为敏感的指标是幼虫平均虫口密度(X_1)、雌成虫虫口密度(X_2)、下层虫口密度(X_5)；其次为雄成虫虫口密度(X_3)、冠层虫口密度(X_4)；最不敏感的是诱捕器成虫捕获量。这些结果表明：环境因子对松墨天牛数量变化有重要影响，但不同因子影响程度不同，不同的松墨天牛数量指标对环境变化的敏感程度也不同。

关键词：松墨天牛；马尾松；种群密度；环境因子；坐标变换对应分析
中图分类号：Q969　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：0454-6296(2010)02-0183-09

Correspondence analysis between population density and environmental factors of *Monochamus alternatus* Hope (Coleoptera: Cerambycidae) in Wuyishan Scenic Spot by coordinate transformation

DU Rui-Qing[1,2], CHEN Shun-Li[2,*], YU Pei-Wang[3], FAN Zheng-Zhang[2] (1. Department of Life Science and Technique, Nanyang Normal College, Nanyang, Henan 473061, China; 2. Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. Forestry Bureau of Wuyishan City, Wuyishan, Fujian 354300, China)

Abstract: This study aims to analyze the relationship between population density of the long-horn beetle, *Monochamus alternatus* Hope and environmental factors. In ten standard monitoring sites in pine forest of Wuyishan Scenic Spot, six density indices and seven environmental factors were sampled and the survey results were analysed corresponding to the coordinate transformation. The results showed that altitude (Y_1) had a positive effect on the six density indices, while canopy size (Y_6) and ground cover area (Y_7) had negative effects on them. Tree age (Y_2) and height (Y_3) and slope position (Y_4) also had positive but not significant effects. Slope position (Y_5) mostly was not closed with the index. The population densities of larvae (X_1), female adults (X_2) and adults at the lower layer (X_5) were most susceptive to the environmental factors, followed by the population densities of male adults (X_3), and adults at the canopy (X_4). The adult catches in trap were the most insensitive to the environmental factors. It is so concluded that the effect of environmental factors on population densities of *M. alternatus* is significant but different.

Key words: *Monochamus alternatus*; *Pinus massoniana*; population density; environmental factor; correspondence analysis by coordinate transformation

松墨天牛 *Monochamus alternatus* Hope 又称松褐天牛、松天牛等，是我国松树危险性病害松材线虫病 *Bursaphelenchus xylophilus* 的主要传播媒介，通过成虫取食和对受害木、衰弱木的选择性产卵而传播松材线虫。由于该虫成虫寿命长、迁移能力强，且幼虫可通过木材制品而进行远距离传播，因此是松材线虫

基金项目：福建省科技厅重大科技专项(2006NZ0001-2)；武夷山风景名胜区管委会资助项目；南阳师范学院科研项目
作者简介：杜瑞卿，男，1968 年生，硕士，讲师，主要从事生物数学研究，E-mail：duruiqing8@163.com
* 通讯作者 Corresponding author, E-mail：cslfjau@126.com
收稿日期 Received：2009-09-07；接受日期 Accepted：2009-12-20

扩散的主要元凶，控制松墨天牛是预防松材线虫病的根本途径(Mamiya and Enda, 1972; Kobayashi *et al*., 1984; Maehara and Futai, 1996)。国内外对该虫发生规律和控制技术等已有较多的研究(Linsley, 1959 ; Fujimoto *et al*., 1989; 郝德君等, 2005; Ma *et al*., 2006a, 2006b; 李水清和张钟宁, 2007; 刘洪剑等, 2007; 杨建霞等, 2009), 但有关该虫发生与环境因子关系的研究较少。由于福建武夷山风景区人流量大, 外界干扰和各种工程建设极多, 因此是松材线虫病的敏感区域。该区自 2001 年发现松墨天牛危害以来, 已造成景区部分松树枯死或濒临枯死, 并呈现迅速扩展蔓延的态势(杨爱民, 2004), 并为松材线虫的入侵和快速传播提供了十分有利的条件, 严重地影响了景区森林生态景观、水资源的保护和闽江流域生态环境(陈顺立等, 2001; 王玲萍等, 2002)。鉴于此, 监测松墨天牛在武夷山风景区的发生与分布, 掌握其种群数量变动与环境因子间的关系, 不仅可对该虫综合控制提供科学的依据, 而且对于风景区的旅游发展和生态安全都具有十分重要意义。

目前关于环境因子对昆虫分布特征影响的研究, 基本上是用单一指标对单一指标的分析法, 缺少综合性; 或采用回归分析法, 人为地把环境因子与昆虫分布特征简单线性化, 缺少客观性; 另一种方法是采用排序分析法。但所有排序方法都是基于一定的模型之上, 这种模型反映物种(或属性)特征和环境之间的关系以及在某一环境梯度上的种间关系。最常用的关系模型有两种: 一种是线性模型, 以主分量分析(PCA)为主的线性排序方法, 目前主要是典范主分量分析(CPCA)。另一种是非线性模型, 以对应分析(CA)为基础而发展起来的非线性排序法, 目前主要是典范对应分析(CCA)(赵志模和郭依泉, 1990; 张金屯, 2005), 但把环境因子组成的数据与典范对应分析(CCA)处理物种(或属性)特征组成的数据结果进行关联排序时, 也是采用多元线性回归关系(顾万春和游应添, 1997; 张金屯, 2005)。在把物种(或属性)特征和环境之间关联到同一坐标时, 物种(或属性)特征和环境间的关系大多数情况下是非线性关系。因此, 不难看出目前关于对应分析中存在的不足, 基于此, 本文提出了坐标变换对应分析法。

1 材料与方法

1.1 标准地的设立

武夷山景区位于东经 117°35′ ~ 118°01′, 北纬 27°35′ ~ 27°43′之间, 总面积约 70 km^2; 风景区系红色砂砾岩组成的红层地貌, 即丹霞地貌, 属丘陵地带, 一般海拔高程在 300 ~ 400 m, 相对高差 100 ~ 200 m; 气候属中亚热带湿润型季风气候, 年均气温 17.9℃, 1 月平均气温 8.3℃, 7 月平均气温26.7℃, 年均降水量 2 190 mm, 年均相对湿度 78%, 有雾日超过 120 d。在全面踏查的基础上, 根据武夷山风景区马尾松林的不同生境条件、林分状况, 在风景区内共设立了 10 块松墨天牛监测标准地, 每块监测标准地的面积约 0.1 hm^2, 每块标准地随机抽取样株 30 株, 并用红漆给各样株标号。然后调查各标准地的样株树高、郁闭度、地被物覆盖率, 并应用神达 A700 GPS 测定各标准地的海拔高度、坡向坡位。同时应用福建林科院改制的活虫诱捕器捕捉活成虫, 在各监测标准地内各设 1 个, 共设置 10 个诱捕器监测点。

1.2 调查方法

1.2.1 林间监测标准地调查方法: 每块标准地调查 30 株, 幼虫危害盛期(10 月中旬)调查每株树 2 m以下幼虫蛀入孔数, 计为幼虫数; 成虫盛发期(6 月中旬)分别调查每株树 3.5 m 以上(冠层)及 3.5 m 以下(下层)的成虫数。调查时先调查各样株下层成虫数, 再用 5 m 高铝合金舷梯调查冠层成虫数, 并用长柄宽口捕虫网捕获成虫。

1.2.2 诱捕器诱集成虫: 用铁丝将诱捕器悬挂于两株松树之间, 并使诱芯保持在离地面约 1.5 m 的位置上, 相近的两个诱捕器相距在 50 m 以上; 引诱剂采用由福建林业科学研究院研制的 FJ-Ma-03 型引诱剂(福建省森林病虫害防治检疫总站监制)(杨爱民, 2004), 引诱剂装在开口较小的易拉罐内, 内置脱脂棉, 根据试验要求每 3 d 和每 7 d 添加 1 次引诱剂, 每次添加引诱剂约 90 ~ 110 mL, 添加前先用空瓶将废液取出。每 3 d 收集 1 次诱到标本, 将标本按 A ~ J 监测点的标号分开, 带回室内鉴定, 并记录收集时间、天气状况、统计雌雄数量。

1.3 坐标变换对应分析法

坐标变换对应分析法的基本思想是: (1) 环境因子组成的数据矩阵通过主成分分析, 总可以求得各环境因子在前 3 个主成分的坐标值。(2) 物种(或属性)特征组成的数据矩阵通过主成分分析, 也可以求得各物种(或属性)特征在前 3 个主成分的坐标值。(3) 依据线性空间与线性变换的有关原理, 通过求解环境因子的前 3 个主成分组成的矩阵与物种(或属性)特征前 3 个主成分组成的矩阵间

的过渡矩阵。(4)通过过渡矩阵求出物种(或属性)特征在环境因子前 3 个主成分上的坐标值，从而把环境因子与物种(或属性)特征集中表示在同一坐标系中。(5)依据坐标值可以求出物种(或属性)特征与各环境因子间的矢量夹角和距离，从而分析环境因子对物种(或属性)特征的影响。基本计算过程如下：

1.3.1 原始数据：设有 m 个调查样方(或单位或实体)，n 个物种(或属性、指标)，t 个环境因子(或生态指标)，即有变量组 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 与变量组 $Y_1, Y_2, \cdots, Y_t$。分别组成两个矩阵：物种(或属性、指标)矩阵 $X=(x_{ij})_{m\times n}$；环境因子矩 $Y=(y_{ij})_{m\times t}$。(1)(一般 m 大于 n, t)

1.3.2 数据的标准化处理(或中心化处理)：

$$\text{矩阵 } X=(x_{ij})_{m\times n},\ X'_i=\frac{X_i-\overline{X}_i}{d_i},\ \overline{X_i}=\frac{\sum_{j=1}^{m}x_{ji}}{m},$$

$$d_i^2=\sum_{j=1}^{m}(x_{ji}-\overline{X}_i)^2 \quad (1)$$

形成新的矩阵，$X'=(x'_{ij})_{m\times n}$

同理，变量组 $Y_1, Y_2, \cdots, Y_t$ 形成新的矩阵，$Y'=(y'_{ij})_{m\times t}$　(2)

1.3.3 主成分的求解与因子负载(徐克学，2001；高惠璇，2005)：可求解出变量组 $X_1, X_2, X_i, \cdots, X_n$ 的主成分 $F_1, F_2, \cdots, F_n$，特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$

$$X'_i=(x'_{ij})_{m\times 1}=a_{i1}F_1+a_{i2}F_2+\cdots+a_{in}F_n=a_{i1}\sqrt{\lambda_1}e_1+a_{i2}\sqrt{\lambda_2}e_2+\cdots+a_{in}\sqrt{\lambda_n}e_n \quad (3)$$

同理，可求得变量组 $Y_1, Y_2, \cdots, Y_t$ 的主成分 $f_1, f_2, \cdots, f_t$，特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_t$

$$Y'_i=(y'_{ij})_{m\times 1}=b_{i1}F_1+b_{i2}F_2+\cdots+b_{ip}F_t=b_{i1}\sqrt{\lambda_1}e_1+b_{i2}\sqrt{\lambda_2}e_2+\cdots+b_{in}\sqrt{\lambda_t}e_t \quad (4)$$

(3)式中，$E=(e_1, e_2, \cdots, e_n)$ 是各向量模长是 1 的正交矩阵。同样，(4)式中 $D=(d_1, d_2, \cdots, d_t)$ 是各向量模长是 1 的正交矩阵。

$(a_{i1}\sqrt{\lambda_1}, a_{i2}\sqrt{\lambda_2}, \cdots, a_{in}\sqrt{\lambda_n})$ 称为 X'_I 在 n 个主成分上的坐标(或因子负载)。

同样，称为 $(b_{i1}\sqrt{\lambda_1}, b_{i2}\sqrt{\lambda_2}, \cdots, b_{it}\sqrt{\lambda_t})$ 在 t 个主成分上的坐标(或因子负载)。

1.3.4 求解过渡矩阵：根据累计方差贡献率，我们可以对 $E=(e_1, e_2, \cdots, e_n)$ 和 $D=(d_1, d_2, \cdots, d_t)$ 取相同个数的主成分，不妨设取了 $P(P\leqslant t, P\leqslant n)$ 个数的主成分，形成两个新的矩阵：

$$E'=\begin{Bmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1p} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2p} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ e_{m1} & e_{m2} & \cdots & e_{mp} \end{Bmatrix}=e_{ij})_{m\times p},\ r(E')=p \quad (5)$$

$$D'=\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1p} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2p} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mp} \end{pmatrix}=(d_{ij})_{m\times p},\ r(D')=p \quad (6)$$

根据矩阵性质，经过初等变换，总可以求出 E' 和 D' 行向量的极大线性无关组，不妨设 E' 和 D' 的前 P 个行向量为极大线性无关组，于是新的矩阵：

$$E''=\begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1p} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2p} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ e_{p1} & e_{p2} & \cdots & e_{pp} \end{pmatrix}=(e_{ij})_{p\times p},\ r(E'')=p \quad (7)$$

$$E''=\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1p} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2p} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ d_{p1} & d_{p2} & \cdots & d_{pp} \end{pmatrix}=(d_{ij})_{p\times p},\ r(D'')=p \quad (8)$$

由 D'' 到 E'' 过渡矩阵 $A=(D'')^{-1}E''$　(9)

1.3.5 坐标变换：已知 X'_i 在 P 个 F 主成分上的坐标为 $Y_i=(a_{i1}\sqrt{\lambda_1}, a_{i2}\sqrt{\lambda_2}, \cdots, a_{ip}\sqrt{\lambda_p})$，那么 X_i 在 P 个 f 主成分上的坐标为 $Z_i=(z_{i1}, z_{i2}, \cdots, z_{ip})$，即 $Z_i^T=(z_{i1}, z_{i2}, \cdots, z_{ip})^T=AY_i^T$　(10)

1.3.6 作图进行矢量夹角与距离分析：根据 $Z_i=(z_{i1}, z_{i2}, \cdots, z_{ip})$，可以把 X'_i 表示在以环境因子数据矩阵 $Y=(y_{ij})_{n\times p}$ 求得的前 P 个 f 主成分为主轴的坐标图中，与 Y'_j 在同一坐标图中表示，根据 Y'_J 的矢量方向，可以看出环境因子 Y_j 对生物种(或属性)的类群的影响，从与 X'_t 的距离判断影响程度。

2 结果与分析

2.1 松墨天牛监测标准地的系统调查结果

在武夷山风景区共设立了 10 块松墨天牛监测标准地，2005－2007 年的监测结果表明，在监测标准地内均发现松墨天牛危害，说明松墨天牛在景区内分布广泛，有扩散蔓延的特点(表 1，2)。

表 1　武夷山景区松墨天牛监测标准地基本概况

Table 1　General situation of ten field forest sites for monitoring *Monochamus alternatus* in Wuyishan Scenic Spot

监测点 Sites	地点 Location	添加引诱剂频次 Frequency adding attractants	林分组成 Forest composition	海拔(m) Elevation	林龄(a) Tree age	树高(m) Tree height	坡向 Slope direction	坡位 Slope location	郁闭度 Forest close degree	地被物覆盖率 Coverage degree
A	大红袍 Dahongpao	3 d	纯林 Pure	217	21	4	阳坡 Shine	中坡 Middle	0.45	0.92
B	大红袍 Dahongpao	7 d	纯林 Pure	218	15	4.2	阴坡 Shade	上坡 Upper	0.48	0.25
C	大红袍 Dahongpao	3 d	纯林 Pure	256	40	8.4	阳坡 Shine	下坡 Lower	0.36	0.31
D	大红袍 Dahongpao	7 d	纯林 Pure	333	40	7.6	阳坡 Shine	上坡 Upper	0.23	0.26
E	武夷宫 Wuyigong	7 d	针阔混交林 Mixed	285	40	10.4	阳坡 Shine	上坡 Upper	0.25	0.50
F	御茶园 Yuchayuan	7 d	纯林 Pure	209	50	5.5	阴坡 Shade	下坡 Lower	0.78	0.88
G	虎啸岩 Huxiaoyan	3 d	纯林 Pure	251	50	5.3	阳坡 Shine	中坡 Middle	0.44	0.10
H	一线天 Yixiantian	7 d	纯林 Pure	237	30	7.2	阴坡 Shade	中坡 Middle	0.35	0.92
I	一线天 Yixiantian	7 d	纯林 Pure	231	25	8.5	阳坡 Shine	下坡 Lower	0.72	0.83
J	水帘洞 Shuiliandong	7 d	纯林 Pure	212	15	4.2	阳坡 Shine	中坡 Middle	0.45	0.92

表 2　武夷山景区各监测点松墨天牛数量特征指标(头/株)

Table 2　Quantitative indices (number of individuals per tree) of *Monochamus alternatus* population in each field site in Wuyishan Scenic Spot

监测点 Sites	地点 Location	幼虫平均虫口密度 Mean larva density	雌成虫平均虫口密度 Mean adult female density	雄成虫平均虫口密度 Mean adult male density	冠层平均成虫密度 Canopy beetle density	下层平均成虫密度 Lower adult density	诱捕器成虫捕获量 Number of the captured adults
A	大红袍 Dahongpao	16.2	7.6	6.4	6.3	7.7	48
B	大红袍 Dahongpao	11.5	5.8	5.1	4.6	6.3	46
C	大红袍 Dahongpao	8.6	4.5	4.1	3.7	4.9	40
D	大红袍 Dahongpao	19.4	10.2	8.1	7.5	10.8	57
E	武夷宫 Wuyigong	22.8	12.2	9.8	9.8	12.1	79
F	御茶园 Yuchayuan	7.3	4.1	3.0	1.3	5.8	26
G	虎啸岩 Huxiaoyan	10.6	4.9	4.4	3.1	6.2	36
H	一线天 Yixiantian	9.9	4.7	4.1	3.1	5.7	33
I	一线天 Yixiantian	7.2	3.9	3.1	2.9	4.2	27
J	水帘洞 Shuiliandong	16.1	6.1	5.8	5.1	6.8	43

从表 1 和表 2 直接观测，观测点 C，D，E 的海拔都比较高，6 个松墨天牛数量指标也比较高，但这 3 个观测点的树高也比较高，又是阳坡，到底与哪个关系密切呢？我们无法直接给出结论。从林龄来看，在高林龄和低林龄上，6 个松墨天牛数量指标没表现出规律性变化，是否对松墨天牛数量指标没有明显影响。总之，我们无法通过对单一指标的直接分析得出比较客观合理的解释和结论。

2.2　坐标变换对应分析法

2.2.1　原始数据：由表 1 和表 2 知道，有 10 个调查单位(地点)，6 个松墨天牛存在数量特征指标，7 个环境因子(或生态指标，其中定性指标坡向、坡位转化为定量指标，本着转变成既计算简便又能区分不同特征的数字原则，阳坡为 2，阴坡为 1，上坡为 3，中坡为 2，下坡为 1。由于要进行标准化处理，所以这种赋值不会影响计算)，可形成松墨天牛存在数量特征指标的数据矩阵 $X=(x_{ij})_{10\times6}$ 和环境因子的数据矩阵 $Y=(y_{ij})_{10\times7}$。

2.2.2　数据的标准化处理：依据公式(1)进行标准化处理，可得松墨天牛存在数量特征指标的数据矩阵 $X=(x_{ij})_{10\times6}$ 的标准化数据矩阵和环境因子的数据矩阵 $Y=(y_{ij})_{10\times7}$ 的标准化数据矩阵。

2.2.3　主成分的求解与因子负载：根据主成分分析法可求得和的主成分、特征值和特征向量。

$X'=(x'_{ij})_{10\times6}$ 特征值依次为：5.795，0.115，0.068，0.021，0.001，0。前 3 个主成分的累计方差贡献率为 99.63%；$Y'=(y'_{ij})_{10\times6}$ 特征值依次为：2.994，1.556，1.000，0.711，0.323，0.271，0.145。前 3 个主成分的累计方差贡献率为 80.02%，所以只取前 3 个主成分。

依据公式(3)可求得幼虫平均虫口密度(X_1)、雌成虫虫口密度(X_2)、雄成虫虫口密度(X_3) 冠层虫口密度(X_4)、下层虫口密度(X_5)、诱捕器成虫捕获量(X_6)6 指标在 3 个主成分坐标轴上的坐标分别为：(−0.1929，0.0253，0.9793)，(0.0520，0.0765，0.9930)，(−0.0307，−0.0149，0.9989)，(−0.0395，−0.1633，0.9823)，(0.0704，0.2374，0.9687)，(0.1424，−0.1596，0.9738)。

依据公式(4)可求得海拔(Y_1)、林龄(Y_2)、树高(Y_3)、坡向(Y_4)、坡位(Y_5)、郁闭度(Y_6)、地被物覆盖率(Y_7)在前 3 个主成分坐标轴上的坐标分别为：(0.0053，0.1562，−0.9050)，(−0.4480，0.7019，−0.4181)，(0.2206，0.4883，−0.5776)，(0.7223，0.1453，−0.4843)，(−0.1601，−0.7686，−0.5075)，(−0.1261，0.4278，0.8043)，(0.4339，0.0734，0.7258)。

2.2.4　求解过渡矩阵：由矩阵 $E'=(e_{ij})_{10\times3}$ $r(E')=3$ 和 $D'=(d_{ij})_{10\times3} r(D')=3$，经过初等变换，可求得 $E'=(e_{ij})_{10\times3}$ 的 2，4，10 行为极大线性无关组，见下矩阵：

$E''=(e_{ij})_{3\times3}=[-0.4474, -0.5807, 0.1413; -0.0488, -0.1005, -0.5772; 0.4102, -0.3038, 0.2603]$。

可求得 $D'=(d_{ij})_{12\times3}$ 的 3，5，10 行向量为极大线性无关组，见下矩阵：

$D''=[0.3141, -0.4736, -0.2013; 0.3775, -0.1007, 0.6892; -0.6959, -0.1099, 0.0383]$

由 D'' 到 E'' 过渡矩阵 $A=(D'')^{-1}E''=[-0.6320, 0.2133, -0.3703; 0.3846, 1.3928, -0.2581; 0.3315, -0.0592, -0.6724]$。

2.2.5　坐标变换：依据公式(10)，可求得 6 个松墨天牛存在数量特征指标在环境因子 3 个主成分的坐标为(每列)：

$Z=A*Y=[0.8687, -0.7860, -0.8172, -0.7967, -0.7705, -0.7177; -0.3500, -0.1556, -0.3485, -0.5954, 0.1292, 0.5027; -0.2824, -0.4612, -0.4244, -0.4483, -0.4231, -0.5815]$。

2.2.6　作图进行矢量夹角与距离分析：依据 6 个松墨天牛数量特征指标在环境因子前 3 个主成分的坐标(每列)矩阵 Z 和海拔(Y_1)、林龄(Y_2)、树高(Y_3)、坡向(Y_4)、坡位(Y_5)、郁闭度(Y_6)、地被物覆盖率(Y_7)在前 3 个主成分坐标轴上的坐标作图(图 1)。

从图中明显可以看出 6 个松墨天牛数量特征指标与海拔(Y_1)、树高(Y_3)、坡向(Y_4)关系密切，影响较大；其次与坡位(Y_5)、林龄(Y_2)关系较为密切，影响也较大些；与郁闭度(Y_6)、地被物覆盖率(Y_7)关系较为疏远，影响也不大，特别是与郁闭度(Y_6)。依据 6 个松墨天牛数量特征指标和 7 个环境因子指标在同一个三维主成分坐标系中坐标分量，可计算松墨天牛存在数量特征指标与环境因子间的矢量夹角余弦值和相互间的欧氏距离(表 3)。

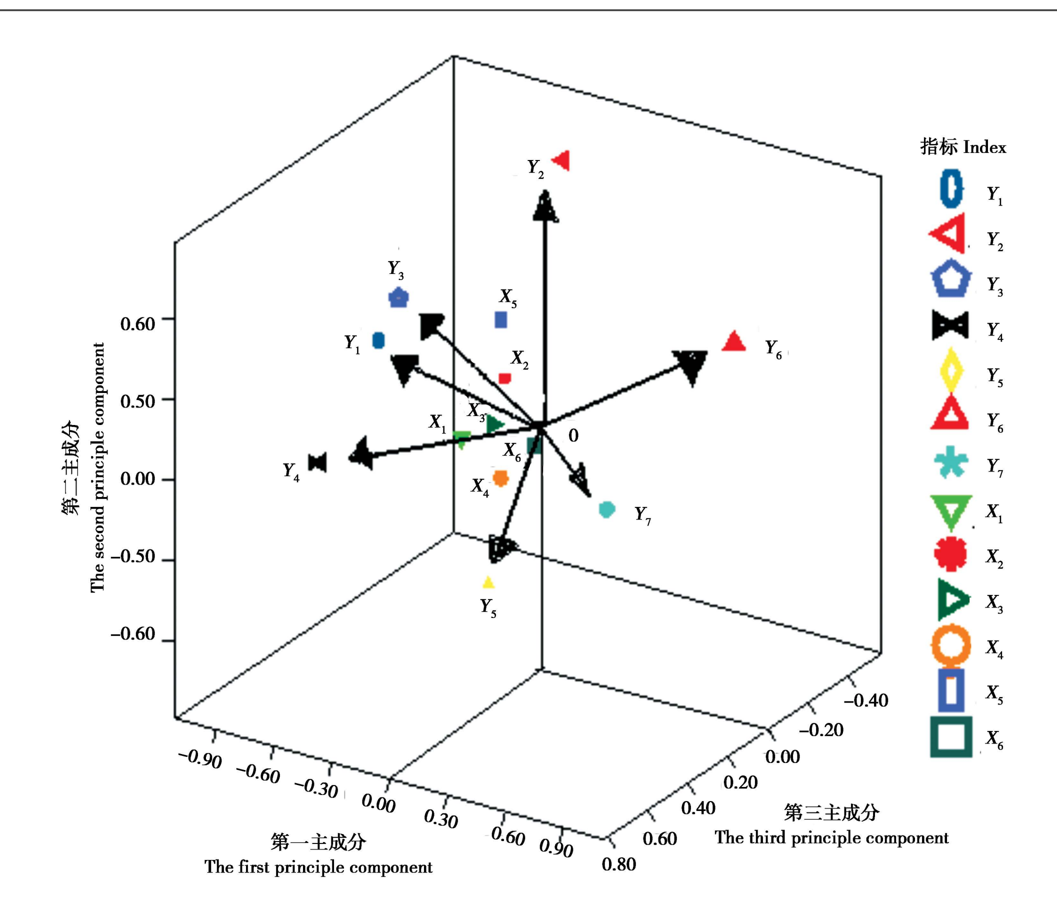


图 1 松墨天牛数量特征指标和环境因子在环境因子前 3 个主成分上的散点分布

Fig. 1 Disseminative dot distribution in numeric indices of *Monochamus alternatus* population and environmental factors in the former three principal environmental factor components

Y_1: 海拔 Elevation (m); Y_2: 林龄 Tree age (a); Y_3: 树高 Tree height (m); Y_4: 坡向 Slope direction; Y_5: 坡位 Slope location; Y_6: 郁闭度 Forest close degree; Y_7: 地被物覆盖率 Coverage degree; X_1: 幼虫平均虫口密度 Mean larva density; X_2: 雌成虫平均虫口密度 Mean female adult density; X_3: 雄成虫平均虫口密度 Mean male adult density; X_4: 冠层平均成虫密度 Canopy beetle density; X_5: 下层平均成虫密度 Mean adult density in lower layer; X_6: 诱捕器成虫捕获量 Number of the captured adults. 表 3 同 The same for Table 3.

表 3 松墨天牛数量特征指标和环境因子指标间的矢量夹角余弦值和欧氏距离(括弧内为欧氏距离)

Table 3 Cosine values and Euclidean distance (in brackets) among vectors for the numeric indices of *Monochamus alternatus* population and environmental factors

	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7
X_1	0.972 (0.583)	0.3859 (1.156)	0.940 (1.02)	0.924 (1.184)	0.186 (0.566)	-0.864 (1.852)	-0.771 (1.799)
X_2	0.931 (0.574)	0.845 (0.933)	0.966 (0.961)	0.537 (1.258)	-0.412 (0.738)	-0.418 (1.727)	-0.997* (1.772)
X_3	1.000* (0.669)	0.607 (1.124)	0.996 (1.083)	0.796 (1.292)	-0.070 (0.585)	-0.708 (1.822)	-0.908 (1.815)
X_4	0.844 (0.885)	0.067 (1.351)	0.779 (1.292)	0.998* (1.420)	0.493 (0.444)	-0.980 (1.927)	-0.525 (1.882)
X_5	0.867 (0.450)	0.915 (0.673)	0.917(0.762)	0.406 (1.181)	-0.542 (0.972)	-0.279 (1.630)	-0.998* (1.725)
X_6	0..687 (0.707)	0.992 (0.383)	0.764 (0.841)	0.127 (1.372)	-0.760 (1.356)	0.008 (1.590)	-0.936 (1.816)

* $P<0.05$

从表 3 可以看出，海拔(Y_1)与幼虫平均虫口密度(X_1)、雌成虫虫口密度(X_2)、雄成虫虫口密度(X_3)、冠层虫口密度(X_4)、下层虫口密度(X_5)矢量夹角余弦值都很大，特别是与雄成虫虫口密度(X_3)矢量夹角余弦值为 1，说明海拔变化对幼虫平均虫口密度(X_1)、雌成虫虫口密度(X_2)、雄成虫虫口密度(X_3)、冠层虫口密度(X_4)、下层虫口密度(X_5)都有正向的促进作用，关系密切。从括号内距离来

看，与幼虫平均虫口密度(X_1)、雌成虫虫口密度(X_2)、下层虫口密度(X_5)距离小，对它的影响程度大。

林龄(Y_2)与雌成虫虫口密度(X_2)、下层虫口密度(X_5)、诱捕器成虫捕获量(X_6)矢量夹角余弦值都很大，说明林龄(Y_2)变化对雌成虫虫口密度(X_2)、下层虫口密度(X_5)、诱捕器成虫捕获量(X_6)都有正向的促进作用，关系密切。但从距离来看，只有与诱捕器成虫捕获量(X_6)距离小，对它的影响程度大，对其他指标的影响程度不大。

树高(Y_3)与幼虫平均虫口密度(X_1)、雌成虫虫口密度(X_2)、雄成虫虫口密度(X_3)、下层虫口密度(X_5)矢量夹角余弦值都很大，说明树高(Y_3)变化对幼虫平均虫口密度(X_1)、雌成虫虫口密度(X_2)、雄成虫虫口密度(X_3)、下层虫口密度(X_5)都有正向的促进作用，关系密切。但从距离来看，都比较大，影响程度不大。

坡向(Y_4)与幼虫平均虫口密度(X_1)、冠层虫口密度(X_4)矢量夹角余弦值都很大，说明坡向(Y_4)变化对幼虫平均虫口密度(X_1)、冠层虫口密度(X_4)有正向的促进作用，关系密切。但从距离来看，都比较大，影响程度不大。

坡位(Y_5)与幼虫平均虫口密度(X_1)、雌成虫虫口密度(X_2)、雄成虫虫口密度(X_3)、冠层虫口密度(X_4)、下层虫口密度(X_5)、诱捕器成虫捕获量(X_6)6 个指标的矢量夹角余弦值都很小，有的还是负的，说明坡位(Y_5)变化与松墨天牛 6 个指标的关系不密切，或者有一些负向变化的影响。从距离来看，与冠层虫口密度(X_4)的距离较小，对它的影响程度要大一些，而且是正向影响。

郁闭度(Y_6)与幼虫平均虫口密度(X_1)、冠层虫口密度(X_4)矢量夹角余弦值都很小，是负的，说明郁闭度(Y_6)变化对幼虫平均虫口密度(X_1)、冠层虫口密度(X_4)有反向的抑制作用，关系密切。但从距离来看，与松墨天牛 6 个指标的距离都很大，对它们的影响程度非常小。

地被物覆盖率(Y_7)与雌成虫虫口密度(X_2)、雄成虫虫口密度(X_3)、下层虫口密度(X_5)、诱捕器成虫捕获量(X_6)矢量夹角余弦值都很小，是负的，说明地被物覆盖率(Y_7)变化对幼虫平均虫口密度(X_1)、冠层虫口密度(X_4)有反向的抑制作用，关系密切。但从距离来看，与松墨天牛 6 个指标的距离都很大，对它们的影响程度非常小。

从松墨天牛 6 个指标与环境因子的关系和影响程度来看，依据矢量夹角余弦绝对值大于 0.8 的个数而言，最为敏感的指标是幼虫平均虫口密度(X_1)、雌成虫虫口密度(X_2)、下层虫口密度(X_5)；其次为雄成虫虫口密度(X_3)、冠层虫口密度(X_4)；最不敏感的是诱捕器成虫捕获量。

依据表 3 中矢量夹角余弦值的大小，可以看出与 6 个松墨天牛数量特征指标关系密切的环境指标主要是海拔(Y_1)、树高(Y_3)、地被物覆盖率(Y_7)、林龄(Y_2)，因此，结合实际情况来讨论转换对应分析的结果。

从实际情况来看，海拔最高的观测点 D，E，其 6 个松墨天牛数量特征指标也是最高的，海拔最低的观测点 F，其 6 个松墨天牛数量特征指标也是最低的，也体现了之间正向的密切关系，说明转换对应分析的结果与实际基本符合。

从实际情况来看，树高(Y_3)从 5 ~ 10.4 m 的变化过程中，6 个松墨天牛数量特征指标值也在随着增大，体现了正向变化的特征，在 10.4 m 时，基本达到了最高值。在 5 m 以下时，又略有所增加。总之，树高(Y_3)与 6 个松墨天牛数量特征指标间的关系表现为一种密切而复杂的关系，但树高的变化对各指标值的影响程度没有明显特征。

从实际情况来看，地被物覆盖率(Y_7)在 0.5 时，6 个松墨天牛数量特征指标值都表现为最大；地被物覆盖率(Y_7)从 0.1 到 0.5 的变化过程中，6 个松墨天牛数量特征指标值也在随着增大，体现了正向变化的特征，但相对变化不大；但地被物覆盖率(Y_7)从 0.5 到 0.92 的变化中，6 个松墨天牛数量特征指标值的变化就相对较大，而且各指标值基本上是减小的。转换对应分析的结果与实际基本符合，也体现了这种复杂且负向变化的基本关系。

从实际情况来看，林龄(Y_2)从低龄 15a 向 40a 变化过程中，6 个松墨天牛数量特征指标值也在随着增大，体现了正向变化的特征，在 40a 时，基本达到了最高值，在 50a 时表现为减少。从各指标的变化特征来看，诱捕器成虫捕获量的变化与林龄(Y_2)变化较为相近。总之，林龄(Y_2)与 6 个松墨天牛数量特征指标间的关系表现为一种密切而复杂的关系，转换对应分析的结果与实际基本符合，也体现了这种复杂关系。

总之，通过以上转换对应分析的结果与实际分析讨论的结果的比较，可以看出两者的基本一致性，说明转换对应分析的可行性和可靠性。

3 结论与讨论

通过以上对调查结果的分析，可以得出武夷山风景区10个观测点松墨天牛种群分布特征与环境因子的关系为：

(1)与松墨天牛6个指标关系最为密切的环境因子是海拔(Y_1)、郁闭度(Y_6)和地被物覆盖率(Y_7)，其中海拔(Y_1)对6个指标都有正向的促进作用，对它的影响程度也较大；郁闭度(Y_6)和地被物覆盖率(Y_7)对6个指标都有负向的抑制作用，但影响程度都非常小。

(2)与松墨天牛6个指标关系较为密切的是林龄(Y_2)、树高(Y_3)、坡向(Y_4)，也都是正向的促进作用，但对它的影响程度也较小。

(3)与松墨天牛6个指标关系最不密切的是坡位(Y_5)，影响程度也较小。

(4)从松墨天牛6个指标与环境因子的关系和影响程度来看，依据矢量夹角余弦绝对值大于0.8的个数而言，最为敏感的指标是幼虫平均虫口密度(X_1)、雌成虫虫口密度(X_2)、下层虫口密度(X_5)；其次为雄成虫虫口密度(X_3)、冠层虫口密度(X_4)；最不敏感的是诱捕器成虫捕获量。

(5)本文提出的坐标转换对应分析法，既在理论上是科学合理的，又在本研究的实际应用中，又是比较成功的。在原理和方法上也克服了以主分量分析(PCA)为主的线性排序方法和以对应分析(CA)为基础而发展起来的非线性排序法中将不同数据组进行线性关联的不足(顾万春和游应添，1997)，采用了非线性关联，有一定的创新性。当然也存在一些不足，计算复杂，不宜掌握应用，需进一步程序化；转变过程中造成一定的信息损失，同时使数据的直接生物学意义淡化；坐标变换的方法，有待进一步的深入研究。

武夷山风景区是我国重要的风景区，在整个景区生态观赏林中，马尾松林占了70%，其林分的平均密度达2 400 株/hm^2，可见马尾松林在武夷山区景观上有着及其重要的地位。开展松墨天牛的监测，控制该害虫对松林的危害，防止松材线虫病的扩散蔓延，将有效保护武夷山和福建省的松林正常生长。如何选择松墨天牛发生的有效观测指标，寻找与松墨天牛发生关系密切的环境因素，揭示它们之间的相互关系，这对于预防松墨天牛发生，保护松林正常生长，将有重要意义，本文研究结果也将提供了重要参考价值。

参考文献 (References)

Chen SL, Wang LP, Huang JC, Yu PW, Cheng B, 2001. Study on the vertical distribution of *Monochamus alternatus* Hope larvae on *Pinus massoniana*. *Journal of Fujian College of Forestry*, 21(4): 297-300. [陈顺立，王玲萍，黄金聪，余培旺，程保，2001. 松墨天牛幼虫在马尾松树上垂直分布的研究. 福建林学院学报，21(4): 297-300]

Fujimoto Y, Toda T, Nishimura K, Yamate H, Fuyuno S, 1989. Breeding project on resistance to the pine-wood nematode: an outline of the research and the achievement of the project for ten years. *Bulletin of the Forest Tree Breeding Institute*, 29(2): 17-20.

Gao HX, 2005. Application of Multivariate Statistic Analysis. Peking University Press, Beijing. 324-341. [高惠璇，2005. 应用多元统计分析. 北京：北京大学出版社. 324-341]

Gu WC, You YT, 1997. Forest tree breeding regionalization on the basis of ecological gradient axis (EGA). *Acta Ecologca Sinica*, 17(2): 159-169. [顾万春，游应添，1997. 生态梯度轴(EGA)区划林木育种区的研究. 生态学报，17(2): 159-169]

Hao DJ, Zhang YH, Dai HG, Wang Y, 2005. Oviposition preference of *Monochamus alternatus* Hope (Coleoptera: Cerambycidae) to host plants. *Acta Entomologica Sinica*, 48(3): 460-464. [郝德君，张永慧，戴华国，王焱，2005. 松墨天牛对寄主树木的产卵选择. 昆虫学报，48(3): 460-464]

Kobayashi F, Yamane A, Ikeda T, 1984. The Japanese pine sawyer beetle as the vector of pine wilt disease. *Annual Review of Entomology*, 29: 115-135.

Li SQ, Zhang ZN, 2007. Effects of *Monochamus alternatus* Hope feeding and artificial damage on the contents of several chemicals in needles of *Pinus massoniana*. *Acta Entomologica Sinica*, 50(2): 95-100. [李水清，张钟宁，2007. 松墨天牛取食和人为损伤对马尾松针叶部分化学物质含量的影响. 昆虫学报，50(2): 95-100]

Linsley EG, 1959. Ecology of Cerambycidae. *Ann. Rev. Entomol.*, (4): 99-138.

Liu HJ, Piao CG, Wang LF, Shen XC, Zheng RT, Shu QL, 2007. Biocontrol of *Monochamus alternatus* by *Beauveria bassiana* and *Scleroderma guani*. *Scientia Silvae Sinicae*, 43(5): 64-68. [刘洪剑，朴春根，汪来发，申相澈，郑荣镇，束庆龙，2007. 白僵菌和肿腿蜂对松墨天牛幼虫的作用. 林业科学，43(5): 64-68]

Ma RY, Hao SG, Kong WN, Sun JH, Kang L, 2006a. Cold hardiness as a factor for accessing the potential distribution of the Japanese pine sawyer *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) in China. *Annual Forest Science*. 63: 449-456.

Ma RY, Hao SG, Tian J, Sun JH, Kang L, 2006b. Seasonal variation in cold-hardiness of the Japanese pine sawyer *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae). *Environmental Entomology*, 35(4): 881-886.

Maehara N, Futai K, 1996. Factors affecting both the numbers of the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda: Aphelenchoididae), carried by the Japanese pine sawyer,

Monochamus alternatus (Coleoptera: Cerambycidae), and the nematode's life history. *Applied Entomology and Zoology*, 31: 443 – 452.

Mamiya Y, Enda N, 1972. Transmission of *Bursaphelenchus lignicolus* (Nematoda: Aphelenchoidae) by *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae). *Nematologica*, 18: 159 – 162.

Wang LP, Chen SL, Wu FH, Tang CS, Xie YX, 2002. Study on the spatial pattern of larvae of *Monochamus alternatus* Hope. *Journal of Fujian College of Forestry*, 22(1): 78 – 81. [王玲萍，陈顺立，武福华，汤陈生，谢毅璇，2002. 松墨天牛幼虫空间格局的研究. 福建林学院学报，22(1): 78 – 81]

Xu KX, 2001. Biomathematics. Science Press, Beijing. 65 – 69. [徐克学，2001. 生物数学. 北京：科学出版社. 65 – 69]

Yang AM, 2004. Study on the change law of population dynamics of *Monochamus alternatus* Hope adults in forests. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 31(2): 62 – 64. [杨爱民，2004. 松墨天牛成虫林间种群数量动态变动规律的初步研究. 福建林业科技，31(2): 62 – 64]

Yang JX, Hao DJ, Zhou SD, Dai HG, 2009. Effects of plant hosts on the nutrient indices and activity of the esterase and carboxylesterase of *Monochamus alternatus*. *Scientia Silvae Sinicae*, 45(1): 97 – 99. [杨建霞，郝德君，周曙东，戴华国，2009. 寄主植物对松墨天牛的营养效应及对体内酯酶与羧酸酯酶活性的影响. 林业科学，45(1): 97 – 99]

Zhang JT, 2005. Quantitative Ecology. Science Press, Beijing. 125, 140, 157. [张金屯，2005. 数量生态学. 北京：科学出版社. 125, 140, 157]

Zhao ZM, Guo YQ, 1990. Principle and Methods of Community Ecology. Publishing House of Scientific and Technical Documentation (Chongqing Branch), Chongqing. 233 – 261. [赵志模，郭依泉，1990. 群落生态学原理与方法. 重庆：科学技术文献出版社重庆分社. 233 – 261]

（责任编辑：袁德成）